

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2019.06.011

# 基于BP神经网络的地下采场爆破振速预测\*

马海越<sup>①②</sup> 张云鹏<sup>①②</sup> 刘宏颖<sup>①②</sup>

①华北理工大学河北省矿业开发与技术重点实验室(河北唐山,063210)

②华北理工大学矿业工程学院(河北唐山,063210)

[摘要] 为降低矿石开采中爆破振动的危害并达到最佳爆破效果,以河北唐山某矿山地下采场-156 m阶段爆破开采为例,采集了爆破振动监测数据,运用BP神经网络与萨道夫斯基经验公式分别对爆破峰值振速进行预测。结果表明:BP神经网络平均误差为17.22%;萨氏公式平均误差为40.76%。BP神经网络预测地下采场爆破振速是可行的。

[关键词] BP神经网络;爆破振动;地下采场;振速预测

[分类号] TD235.1

## Prediction of Blasting Vibration Velocity in Underground Stope Based on BP Neural Network

MA Haiyue<sup>①②</sup>, ZHANG Yunpeng<sup>①②</sup>, LIU Hongying<sup>①②</sup>

①Mining Development and Safety Technology Key Laboratory, North China University of Science and Technology (Hebei Tangshan, 063210)

②College of Mining Engineering, North China University of Science and Technology (Hebei Tangshan, 063210)

[ABSTRACT] In order to eliminate the harm of blasting vibration and achieve the optimum blasting effect, blasting vibration velocity at -156 m stage in an underground stope of Tangshan was predicted and studied. Monitoring data of blasting vibration were collected, and the peak value of blasting vibration was predicted by BP (back-propagation) network model and Sadov's Formula. The results show that the average error of BP neural network is 17.22%, and the average error of Sadov's Formula is 40.76%. It is feasible to use BP neural network method to predict the blasting vibration velocity of underground stope.

[KEYWORDS] back-propagation network; blasting vibration; underground stope; vibration velocity prediction

## 引言

矿山开采爆破产生的地震及振动是爆破有害效应之一<sup>[1-5]</sup>。相关学者对露天采场爆破振动的研究较多。包括地震波传播规律、建筑物安全判据、爆破地震监测与预测等<sup>[6-9]</sup>。

常用的研究方法有萨道夫斯基经验(萨氏)公式、灰色关联理论,神经网络方法等<sup>[8,10-13]</sup>。萨氏公式应用较为普遍。灰色关联分析是通过统计序列几何关系的标记来计算系统中多因素间关联程度<sup>[10]</sup>;将矿山爆破设计数据和实测数据输入到 Mat-

lab 中进行灰色关联矩阵计算,就可得出影响爆破振动因素的主次顺序及关联度<sup>[14]</sup>,可以为矿山爆破设计提供参考。BP神经网络(back-propagation network),即反向传播神经网络,是对生物体中神经元的近似仿真。通过样本数据的不断训练,逼近期望输出,同时找到输入变量与输出变量之间的非线性关系;将有关数据输入到训练好的BP神经网络中,就能够得到准确度较高的预测结果<sup>[11-12,15]</sup>。例如,将实测最大段药量、爆心距、爆破分段数、泊松比等与岩石基本质量指标选为输入变量,得到的预测结果与实测振速的相对误差较小<sup>[13]</sup>。由实测数据建立爆破垂直振速神经网络预测模型,经验证,发现预

\* 收稿日期:2019-05-17

基金项目:河北省自然科学基金项目(E2016209388);河北省教育厅项目(ZD2015020)

第一作者:马海越(1994-),男,硕士,主要从事安全管理与评价等研究。E-mail:1309132@163.com

测精度较高<sup>[14,16]</sup>。

地下采场爆破不同于露天爆破。露天爆破地震波一般是沿地表传播,属于表面波;而地下采场爆破地震波沿岩体传播,属于体积波。有关地下采场爆破地震研究相对较少。目前主要的研究方法是对收集的爆破振动数据进行回归分析,计算出萨氏公式的  $K$  和  $\alpha$  值,再代回萨氏公式,计算既定距离和单段装药量下的振速,将振速和比例药量进行线性拟合,得出爆破振动波传播衰减规律<sup>[17-18]</sup>。

本文中,以实际观测的数据为基础,基于 BP 神经网络及萨氏公式预测地下采场爆破的峰值振速。

### 1 爆破振动观测

河北省唐山市某铁矿地下采场现阶段使用无底柱分段崩落法,阶段高度为 60 m,分段高度 12 m。I# 矿体进路间距 10.5 m,回采进路沿矿体走向分

布,矿块长度为 100 m。II# 矿体进路间距 12.5 m,回采进路垂直矿体走向分布,回采巷道均为矩形,回采方式为由上向下分层<sup>[19]</sup>。开采深度为 -156 m,炮孔直径为 65 mm,孔深 6.7 ~ 15.0 m,采用乳化炸药,条形连续装药结构,最小抵抗线 1.37 ~ 1.93 m。

现场测试时最大药量为 420 kg,测点布置在爆心距 12.5 ~ 50.1 m,水平高度 -156 ~ -132 m。测得 3 轴方向的峰值振速与主频,如表 1 所示。

图 1 为测振方案及仪器布点。在地下采场内进行爆破振动数据采集,将 5 台 TC-4850 测振仪布置在 23# ~ 29# 水平进路,仪器的位置随每次爆破地点的不同做出相应调整。安装时,传感器应保持水平,在水平的地面使用速凝石膏将其牢牢固定;若岩石环境无法使用速凝石膏,则需要将传感器固定在配套的铁质底托上,再将铁钎插入岩石,确保传感器稳固后,与底托拧紧,最后将传感器 X 轴拧向炸药爆炸的地方。

表 1 现场测试数据  
Tab. 1 Field vibration data

起爆药量/ kg	爆心距/ m	水平高度/ m	峰值振动速度/( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )			$v_{\text{合}}/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	振动主频/Hz		
			X	Y	Z		X	Y	Z
410	12.5	-132	13.32	17.30	5.46	22.51	20.25	20.73	93.05
390	12.5	-144	12.96	13.11	7.62	19.95	19.28	17.20	17.28
410	15.5	-156	11.95	6.36	2.54	13.77	13.27	30.30	27.78
400	15.6	-132	5.51	4.93	5.94	9.48	35.09	25.48	77.67
420	17.7	-144	11.69	12.20	4.79	17.56	41.24	36.70	18.96
410	18.3	-156	3.17	4.88	4.55	7.39	18.69	21.98	53.85
420	24.2	-132	3.82	4.96	4.86	7.76	13.94	11.02	49.08
410	25.3	-156	5.36	1.32	7.23	9.10	28.57	15.26	84.21
410	27.2	-156	2.32	3.99	1.85	4.97	44.94	55.56	26.85
400	30.5	-132	3.32	3.76	1.92	5.37	45.20	51.61	15.15
400	31.5	-144	3.07	4.05	1.24	5.23	22.35	23.60	56.86
420	36.3	-156	1.11	2.46	1.36	3.02	33.06	39.41	30.08
420	37.2	-132	7.50	3.56	3.10	8.86	20.51	16.29	19.40
410	37.5	-144	2.96	0.01	1.75	3.44	35.24	33.33	55.50
420	38.5	-156	2.15	2.98	1.71	4.32	28.88	33.47	56.96
410	39.5	-132	2.67	1.49	1.15	3.27	39.41	43.02	28.69
390	40.3	-144	2.76	2.49	1.27	3.93	34.12	37.01	28.53
400	42.2	-144	1.51	1.92	0.86	2.58	47.01	57.22	39.26
400	44.3	-132	2.28	0.01	0.77	2.41	26.49	27.49	18.52
420	50.1	-144	1.34	0.01	1.21	1.81	26.49	26.23	20.15
410	50.2	-156	1.35	1.40	1.31	2.34	37.15	27.30	18.33
390	52.0	-132	3.39	1.08	0.67	3.62	29.49	31.05	17.51
420	52.6	-144	1.98	2.68	1.16	3.62	35.21	50.00	34.43
410	61.2	-156	1.02	1.40	1.40	2.23	72.07	24.77	57.55

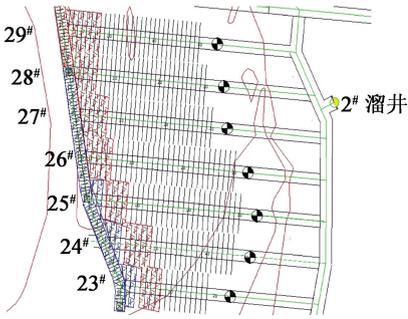


图1 测振方案示意图

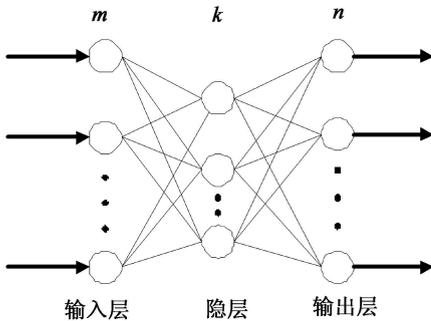
Fig.1 Schematic diagram of vibration measurement scheme

选取19组数据为训练集,其余5组数据为检验集<sup>[5]</sup>。分别将X、Y方向作为后续萨氏公式与BP神经网络预测的样本。

## 2 BP神经网络模型建立

### 2.1 BP神经网络模型

BP神经网络由输入层、隐层和输出层组成,在输入层输入信息后,经过隐层的处理,再由输出层传出,如图2所示。

图2  $m \times k \times n$  3层BP神经网络模型Fig.2  $m \times k \times n$  three-layer BP neural network model

网络选用S型传递函数:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (1)$$

误差函数E通过反传误差函数不断调节网络权值,阈值达到极小。

$$E = \frac{\sum_i (t_i + O_i)^2}{2} \quad (2)$$

式中: $t_i$ 为期望输出; $O_i$ 为网络的计算输出。

### 2.2 模型求解

#### 2.2.1 网络结构设计

1)输入、输出层设计。

该模型以每组数据的爆心距、药量与水平高度

作为输入,以峰值振速作为输出,所以输入层的节点数为3,输出层的节点数为1。

2)隐层设计。

目前,对于隐层中神经元数目的确定并没有明确的公式<sup>[20]</sup>,只能根据经验公式

$$l = \sqrt{n + m} + a \quad (3)$$

式中: $n$ 为输出层神经元个数; $m$ 为输入层神经元个数; $a$ 为 $[1, 10]$ 之间的常数。

根据式(3)可以计算出神经元个数在3~13之间。在本次实验中选择隐层神经元个数为10。

#### 2.2.2 模型实现

选用Matlab 2016a的神经网络工具箱进行网络的训练。预测模型时,将选取的19组样本数据对应的爆心距、药量、水平高度作为 $3 \times 19$ 的变量,命名为Input;对应的峰值振速作为 $1 \times 19$ 的变量,命名为Output;各变量输入到Matlab中。打开Neural Net Fitting工具箱,Inputs中导入 $3 \times 19$ 的变量,Targets中导入 $1 \times 19$ 的变量;选择80%的数据作为训练,15%的数据作验证,5%的数据作预测;选择隐层神经元数量为10,训练算法为Levenberg-Marquardt。参数设定完毕后,开始训练BP神经网络。

## 3 萨氏公式拟合

萨氏公式为

$$v = K \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^\alpha \quad (4)$$

式中: $Q$ 为单段最大药量,kg; $R$ 为爆心距,m; $K$ 、 $\alpha$ 为爆破地震波传播介质、爆破方式和装药结构的参数。对式(4)两边同时取对数,可得到

$$\ln v = \ln K + \alpha \ln \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \quad (5)$$

分别令 $y = \ln v$ ,  $b = \ln K$ ,  $a = \alpha$ ,  $x = \ln \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)$ ,则式(5)变为

$$y = ax + b \quad (6)$$

式(6)是一元线性回归方程, $a$ 和 $b$ 为回归系数, $y$ 是对应于自变量 $x$ 的回归值。

根据线性回归与最小二乘法的基本原理,利用Matlab编程计算,实现萨氏公式的回归推导,得到本次测试的爆破振动衰减方程:

$$v = K \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^\alpha = 27.6159 \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.265} \quad (7)$$

即 $K = 27.6159$ ,  $\alpha = 1.265$ 。所得相关系数为0.8258,拟合效果较好。拟合曲线如图3所示。

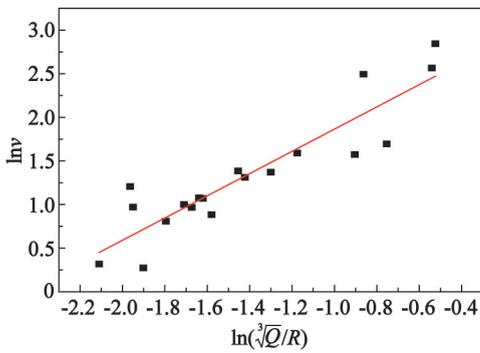


图 3 萨氏公式峰值振速拟合

Fig. 3 Peak vibration velocity fitting of Sadv's Formula

### 4 预测结果分析

选取 5 组数据,利用训练好的 BP 神经网络进行预测<sup>[20]</sup>,并与萨氏公式预测结果进行对比。从表 2 中可以看出,BP 神经网络预测的峰值振速的平均相对误差为 17.22%,萨氏公式预测的峰值振速平均相对误差为 40.76%。在爆心距较小时,萨氏公式预测较为准确;随着爆心距的增加,BP 神经网络预测的结果较为准确。由于 3# 样本的水平高度为 -132m,距爆破工作面 -156 m 较远,萨氏公式预测振速误差较大;这表明高程因素对爆破峰值振速

有一定影响,这可能是萨氏公式中没有反应高程的参数所致。

### 5 结论

1)BP 神经网络预测爆破振动速度适用于对于地下采场等爆破振速影响因素复杂、爆破振速较难测量的地区,不需要建立输出变量与输入变量间的分析模型,便于矿山工作人员操作使用。

2)基于 BP 神经网络模型的峰值振速预测结果平均相对误差为 17.22%,萨氏公式预测的平均相对误差 40.76%;所以将 BP 神经网络应用到地下采场爆破振速预测是可行的,也是对传统萨氏公式预测振速的补充。

3)虽然 BP 神经网络预测已考虑到了水平高度、药量以及爆心距,但对地下采场的地质数字化描述还有所欠缺;同时,收集到的样本参数与数量有限,一定程度上影响了模型的预测精度,还需要在以后的工作中寻求解决办法。

### 参考文献

[1] 费鸿禄,苏强,蒋安俊,等. 爆破载荷下隧道围岩破坏裂隙范围研究[J]. 爆破器材,2019,48(2):51-56.  
FEI H L, SU Q, JIANG A J, et al. Damage fracture range of tunnel surrounding rock under blasting load[J]. Explosive Materials,2019,48(2):51-56.

[2] 张云鹏,杨曦,朱晓玺. 爆破振动影响下露天边坡临界振速及安全距离计算[J]. 化工矿物与加工,2018,(8):28-30.  
ZHANG Y P, YANG X, ZHU X X. Critical velocity and safety distance calculation under influence of blasting vibration[J]. Industrial Minerals and Processing,2018,(8):28-30.

[3] 操鹏,钟冬望,何理,等. 露天矿微差爆破振动对多层建筑的影响[J]. 武汉科技大学学报,2015,38(2):122-124,151.  
CAO P, ZHONG D W, HE L, et al. Effect of millisecond blasting vibration in open-pit mine on the multi-storey building [J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2015,38(2):122-124,151.

[4] 陈钧璠. 铜录山矿露天爆破对地下采场围岩稳定性的影响研究[J]. 中国矿业,1996,5(2):23-26.  
CHEN J F. Effect of blasting in open-pit on stability of surrounding rock of underground stopes in Tonglushan Mine[J]. China Mining Magazine, 1996,5(2):23-26.

[5] 段红波,张聪瑞,帅金山,等. 复杂充填体下残矿回采

表 2 BP 神经网络与萨氏公式预测结果对比

Tab. 2 Comparison of prediction results between BP neural network and Sadv's Formula

样本	1#	2#	3#	4#	5#
药量/ kg	410	410	420	400	410
爆心距/ m	15.5	25.3	37.2	42.2	50.2
水平高度/ m	-156	-156	-132	-144	-156
实测振速/ (cm · s <sup>-1</sup> )	11.95	5.36	7.50	1.92	1.40
BP 预测 振速/ (cm · s <sup>-1</sup> )	9.449 0	3.285 3	6.869 5	2.221 3	1.367 2
相对误差/ %	20.93	38.71	8.41	15.69	2.34
萨氏预测 振速/ (cm · s <sup>-1</sup> )	10.892 1	5.860 5	3.635 5	3.036 3	2.463 2
相对误差/ %	8.85	9.34	51.53	58.14	75.94

- 爆破振动效应研究[J]. 爆破, 2018, 35(2):61-66.
- DUAN H B, ZHANG C R, SHUAI J S, et al. Study on blasting vibration effect of residual mining under complex filling body[J]. Blasting, 2018, 35(2):61-66.
- [6] 王宇新, 李晓杰, 闫鸿浩, 等. 炸药爆速的连续测量技术研究[J]. 爆破器材, 2017, 46(6):59-64.
- WANG Y X, LI X J, YAN H H, et al. Study on continuous testing technique of detonation velocity of explosives [J]. Explosive Materials, 2017, 46(6):59-64.
- [7] CHEN S H, WU J, ZHANG Z H. Blasting vibration characteristics and PPV calculation formula considering cylindrical charge length [J]. Environmental Earth Sciences, 2017, 76:674.
- [8] 赵学龙, 郝家旺. 某矿区爆破振动对邻近建筑稳定性影响研究[J]. 矿业研究与开发, 2018, 38(7):48-51.
- ZHAO X L, HAO J W. The influence of blasting vibration on adjacent buildings stability in a mining area[J]. Mining Research and Development, 2018, 38(7):48-51.
- [9] 李新平, 吴泽民, 罗忆, 等. 中深部大型地下洞室高边坡爆破振动高程效应研究[J]. 爆破, 2019, 36(1):1-5, 43.
- LI X P, WU Z M, LUO Y, et al. Study on blasting vibration altitude effect of high-sidewalls in deep large underground cavern [J]. Blasting, 2019, 36(1):1-5, 43.
- [10] 施建俊, 张琪, 李庆亚, 等. 基于灰色分析和神经网络的爆破振速峰值预测[J]. 中国矿业, 2016, 25(增刊1):410-415.
- SHI J J, ZHANG Q, LI Q Y, et al. Prediction of peak velocity of blasting vibration based on gray analysis and neural network [J]. China Mining Magazine, 2016, 25(Suppl. 1):410-415.
- [11] 申旭鹏, 璩世杰, 王福缘, 等. 基于BP神经网络的爆破振速峰值预测[J]. 爆破, 2013, 30(1):122-125, 130.
- SHEN X P, QU S J, WANG F Y, et al. Prediction of blasting peak particle velocity by BP neural network model [J]. Blasting, 2013, 30(1):122-125, 130.
- [12] 栗闯, 刘敦文, 向海波, 等. 基于BP神经网络不同输入变量的爆破振速预测[J]. 工业安全与环保, 2012, 38(2):51-52, 56.
- SU C, LIU D W, XIANG H B, et al. Prediction of blasting vibration by BP neural network based on different input variables [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2012, 38(2):51-52, 56.
- [13] 张袁娟. 露天矿爆破振动对边坡的影响及其预测研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
- ZHANG Y J. Influence of blasting vibration to open-pit slope and vibration prediction[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012.
- [14] 张青成, 王家磊, 李德璇, 等. 露天矿山爆破振动影响因素分析研究[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2013, 32(10):1334-1338.
- ZHANG Q C, WANG J L, LI D X, et al. Gray correlation method in the application of influence factors analysis of open-pit mine blasting vibration [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2013, 32(10):1334-1338.
- [15] LV S R, LV S J. Applying BP neural network model to forecast peak velocity of blasting ground vibration[J]. Procedia Engineering, 2011, 26:257-263.
- [16] 张云鹏, 杨曦, 朱晓玺. 基于BP神经网络的多台阶地形爆破振速预测对比分析[J]. 矿业研究与开发, 2017, 37(6):44-46.
- ZHANG Y P, YANG X, ZHU X X. Comparative analysis of blasting vibration velocity prediction based on BP neural network in multi-level terrain [J]. Mining Research and Development, 2017, 37(6):44-46.
- [17] 崔毛毛. 地下采矿爆破震动对地面民房建筑物的影响[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2012.
- CUI M M. Damage of the building on underground mining blasting vibration [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2012.
- [18] 王鹰鹏, 汪令辉. 冬瓜山铜矿地下采场爆破振动传播规律研究[J]. 现代矿业, 2013(12):15-17.
- WANG Y P, WANG L H. Research on the propagation law of underground mining blasting vibration in Dongguashan Copper Mine [J]. Modern Mining, 2013(12):15-17.
- [19] 刘王政. 地下深孔爆破振动作用下采空区及充填体稳定性研究[D]. 唐山: 华北理工大学, 2016.
- LIU W Z. Study on the stability of stope and filling body under the effect of underground deep-hole blasting vibration [D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2016.
- [20] BADRAKH-YERUUL T, 夏岸雄, 张建华, 等. 基于遗传算法的神经网络在爆破振动预测中的应用[J]. 爆破, 2014, 31(3):140-144.
- BADRAKH-YERUUL T, XIA A X, ZHANG J H, et al. Application of neural network based on genetic algorithm in prediction of blasting vibration [J]. Blasting, 2014, 31(3):140-144.